

多準位系におけるコヒーレントな非線形光学効果に関する基礎的研究

著者	星宮 務
号	654
発行年	1977
URL	http://hdl.handle.net/10097/9390

氏 名	ほし 星	みや 宮	つとむ 務
授 与 学 位	工 学 博 士		
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻		
学 位 論 文 題 目	多準位系におけるコヒーレントな非線形光学効果に 関する基礎的研究		
指 導 教 官	東北大学教授 稲場 文男		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 稲場 文男	東北大学教授 高橋 正	
	東北大学教授 柴田 幸男	東北大学教授 堀江 忠児	

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 総 論

レーザーの出現により，光高調波発生，誘導散乱，多光子吸収などの物質が有する多数のエネルギー準位が関与する種々の非線形光学効果が高効率で実現される様になってきた。これらの非線形光学効果の変換効率を増大するためには，入射光強度を増大する事と，入射光の周波数を変化させて物質に固有の遷移周波数に同調し，共鳴条件を満足させる事により，共鳴による非線形感受率の増大を利用する事が特に重要となる。

多数のエネルギー準位をもつ物質系（多準位系）の特定の準位間にコヒーレント光を共鳴させた場合には，共鳴している準位間での相互作用エネルギーが入射光強度とともに増大し，やがて熱平衡状態に系をもどそうとする緩和過程で失われるエネルギーを上まわる様になると，光と物質とのコヒーレントな相互作用の影響が現われる様になる。物質のエネルギー準位に固有の緩和

時間より短い時間領域において、光と物質とのコヒーレントな強い共鳴的相互作用が起きる場合には、光と物質との緩和の影響を受けない純粋な相互作用が顕著となるため、フォトン・エコーや自己誘導透過等のコヒーレントな非線形光学効果が生じる。

これらの非線形光学効果は、高性能レーザーを用いて実現されてきたものであるが、逆にこれらの非線形光学効果を用いた、2光子レーザーと呼ばれる原理的に全く新しいレーザーが近年提案されており、任意の周波数分割比での周波数の異なる2光子遷移を用いた2波長発振に興味もたれている。

本研究は、以上の観点から、多準位を有する物質系における非線形応答を、物質と光とのコヒーレントな相互作用が優勢となる超短時間領域から、物質系の応答の周波数特性が精度よく求まる様な定常的な時間領域に至るまでの種々の時間領域において解析することにより、時間領域と周波数領域との両側面から系統的な検討を加えたものである。

第2章 多準位系における非線形光学効果の基本的考察

現在までに知られている多準位系における非線形光学効果を系統的に分類、概説し、多準位系の状態を記述する密度演算子の運動方程式を種々の時間領域で解く事により、時間領域において独特な振舞をするコヒーレントな非線形光学効果の本質的な特長と意義を明らかにし、また周波数領域における応答特性をも明らかにしている。

第3章 ラマン散乱過程におけるコヒーレントなパルス伝搬効果

ラマン活性媒質における密度演算子の運動方程式をマックスウェル方程式と結合させて解く事により、緩和時間よりも短い時間領域におけるラマン散乱過程に伴って発生するコヒーレントなパルスの伝搬効果について解析的ならびに数値的に検討した。ストークス光の強度がレーザー光の強度に比べて十分に小さい小信号の場合に対して、レーザー光とは逆の後方に伝搬するストークス光が図1に示す様にレーザー光の強度に依存する周期的な変調を受ける事を導いた。

次に、ラマン活性の媒質に対して具体的な検討を加えた結果、 H_2 ガスと CS_2 が物質として適当である事が示されたため、これらの物質定数をもとに数値解析を行ない、ラマン活性媒質中におけるレーザー光とストークス光との過渡的な相互作用について定量的な情報を得る事ができた。

第4章 2光子共鳴にもとづく第3高調波発生過程におけるコヒーレントなパルス伝搬効果

2光子共鳴を利用した第3高調波発生過程に対して、基本波および第3高調波のコヒーレントなパルスの伝搬効果を解析的ならびに数値的に解析した。第3高調波光の強度が基本波であるレー

レーザー光の強度よりも十分に小さい小信号の場合に対して解析的な解を求め、基本波および第3高調波が同じ周期で変調を受ける事を見出した。

次に物質系について具体的な検討を加え、Na原子の3S-4Sおよび3S-5S準位間の2光子共鳴遷移を利用した場合の、基本波および第3高調波の伝搬特性について数値的に詳しく検討した。その結果、図2に示すように、2光子共鳴によるコヒーレントな相互作用のためのレーザー光および第3高調波に強い先端値増幅 (peak amplification) および分裂が生じる事が明らかになった。

また、変換効率の改善をはかるために、変換効率の入射光強度依存性 (area 依存性) やパルス幅依存性についても詳細な検討を加えた結果、基本波の peak amplification によってそのピーク値が伝搬とともに著しく増大するため、第3高調波のピーク値がそれに対応して大きくなり、入射光強度を上まわる可能性がある事を理論的に指摘した。

第5章 均一なスペクトル線の拡がりをもつ粒子系における2光子レーザー発振の解析

従来の1光子レーザーとは全く動作機構を異にする2光子レーザーについて、スペクトル幅が均一な拡がりをもつ2光子遷移の場合の発振動作特性を解析した。図3に示す様な、分布反転を有する3準位系からの任意の周波数 ω_1 , ω_2 を有する2光子遷移の発振光強度の離調特性を解析する事により、図4の右側に示す様に2光子レーザーの場合には中心周波数から離れると発振スペクトルに cut-off 現象が生じる事が明らかになった。また、発振周波数の安定性や、反ストークス型遷移と2光子放出型遷移との競合などの、2光子レーザーを実現する上で見逃す事のできない問題点について詳細に検討するとともに、2光子レーザーの基本的な動作特性を明らかにし、その構成法をも検討した。

第6章 気体粒子系における2光子レーザー発振の解析

本章では前章の解析をドップラー拡がりを有する気体粒子系に拡張して2光子レーザー発振の解析を行ない、発振周波数 ω_1 , ω_2 の組み合わせを変えた時の発振光強度の離調特性について検討した。

その結果、Fabry-Perot 型共振器内に2周波 ω_1 , ω_2 を有する電磁場が定在波として存在するため、物質系は同方向に伝搬する電磁場と2光子共鳴する事によってドップラー効果で広がった利得を有する他に、互いに逆方向に伝搬する電磁場と Doppler-free の相互作用をする事により、 $\omega_1 = \omega_2$ 付近で全粒子が均一な線幅程度の幅内で大きな利得を有し、そのため図5に示す様に離調特性の中央に発振光強度のピークが生じる事が明らかになった。

また、2光子レーザー用の媒質について検討を加え、特に物質定数がよく知られている水銀原子を例にとって、逆転粒子密度のしきい値や、2光子レーザー発振を実現するために必要な注入用のレーザー光強度等の実験条件を明らかにした。この場合、近似式を用いた従来の見積りに比べて、半古典的なレーザー理論にもとづく本論文の方法を用いると、反ストークス光の存在をも含めて、より詳細にかつ定量的に検討する事ができた。また、その結果得られた実験条件を実現できる妥当な範囲にある事が確かめられた。

第7章 結 論

第1章から第6章までの研究成果を総括し、考察を加えて結論とした。本論文では、多準位系における非線形光学現象を、物質に固有の緩和時間より十分に短い時間領域から、物質系の応答が定常となる時間領域に至るまでの種々の時間領域にわたって理論的な解析を行なう事により、多準位系における非線形応答を時間領域および周波数領域の両面から明らかにした。

本研究で理論的に明らかにされた非線形光学効果の新たな知見が、将来新しい光エレクトロニクス装置として実現され、量子エレクトロニクスの発展の基礎となる事を期待して本論文のまとめとする。

謝 辞

終りに本研究に御指導、御鞭撻を賜った稲場文男教授、有益なる御教示を賜った高橋正教授、柴田幸男教授、堀江忠児教授に深く感謝致します。

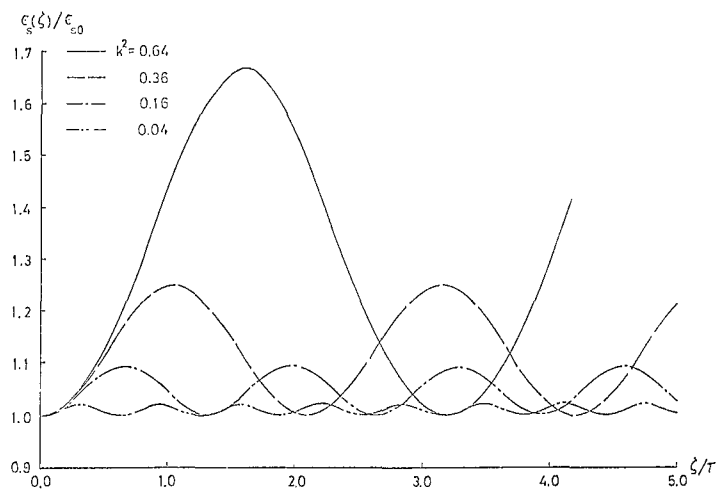


図 1(a) コヒーレントな後方ラマン・パルス伝搬によって発生するストークス光電場の変化

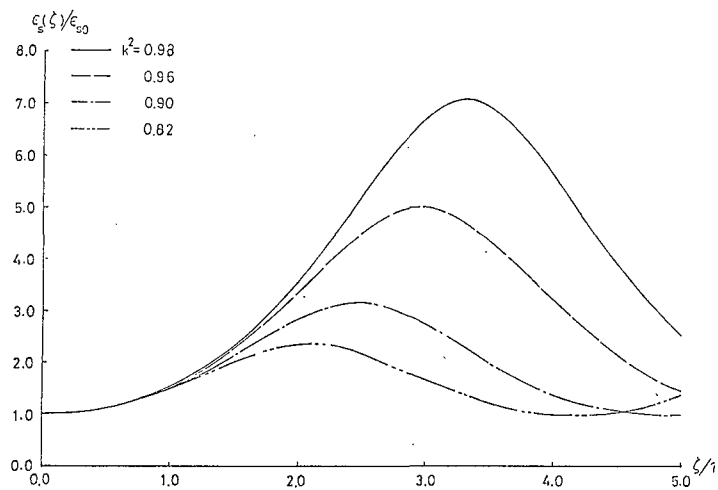


図 1(b) コヒーレントな後方ラマン・パルス伝搬によって発生するストークス光電場の変化

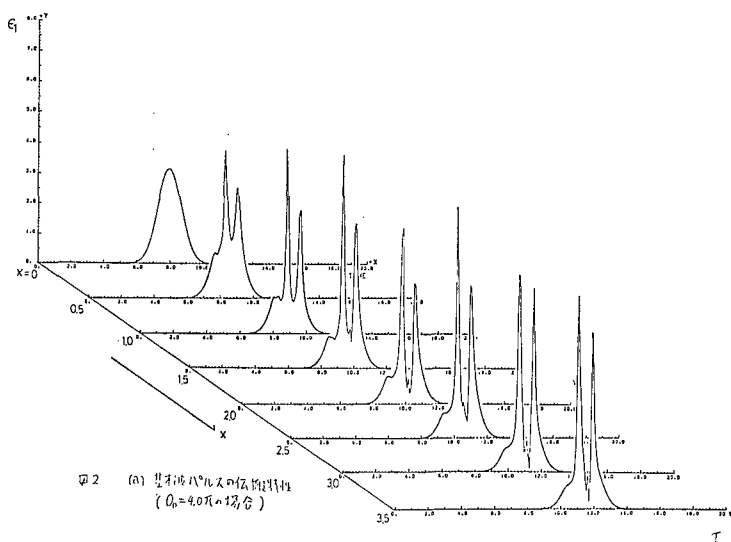


図 2(a) 基本波パルスの伝搬特性 ($\theta_0 = 4.0\pi$ の場合)

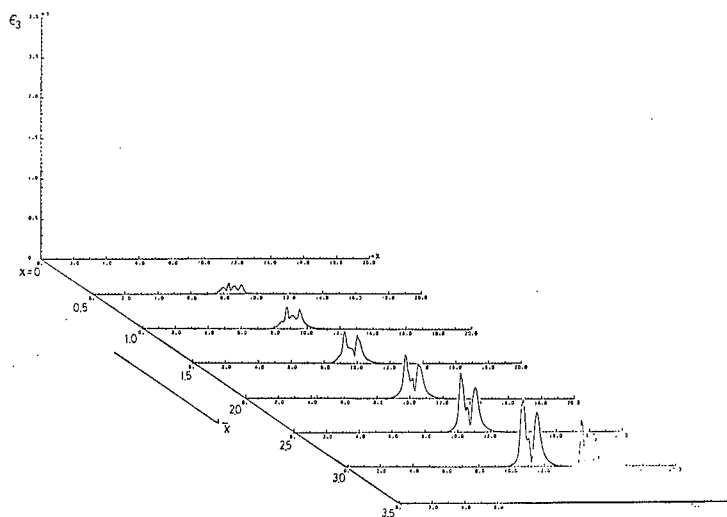


図 2 (b) 第 3 高調波パルスの伝搬特性 ($\theta_0 = 4.0 \pi$ の場合)

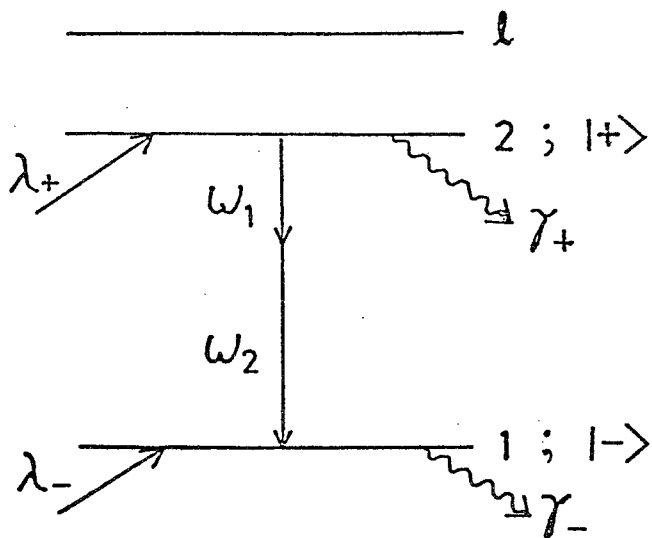


図 3 2 光子レーザーのエネルギー準位図

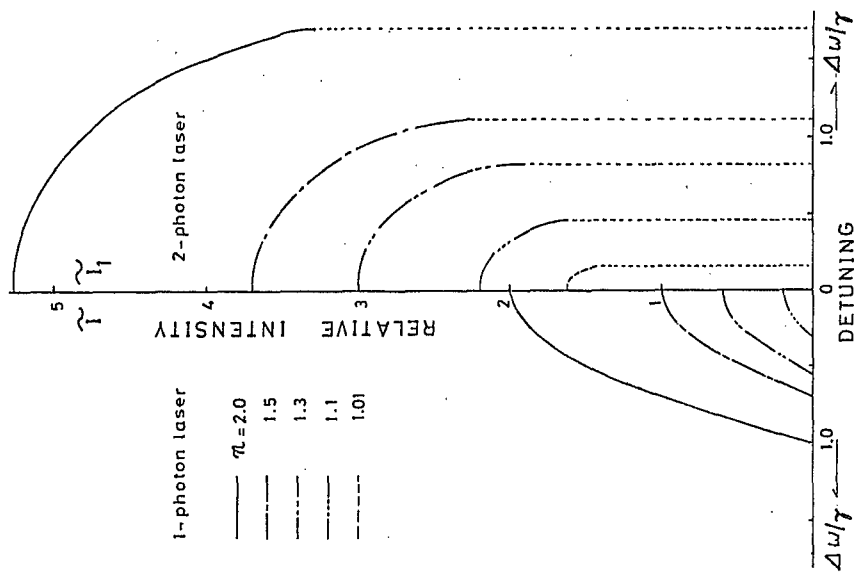


図4 大信号解析における1光子レーザーと2光子レーザーの発振強度の離調特性の比較

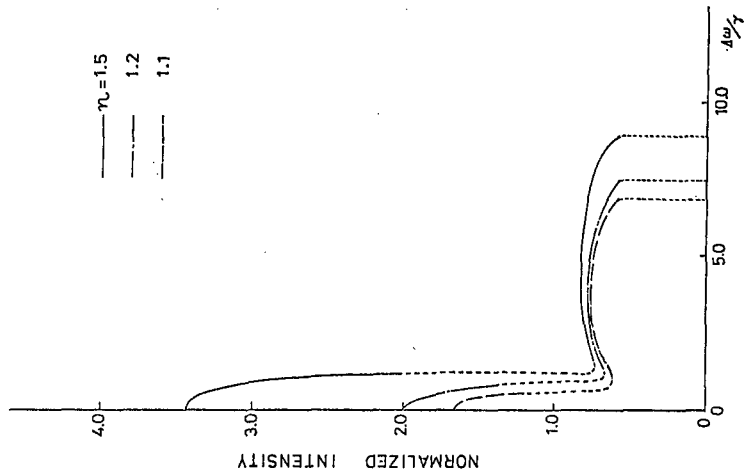


図5 $K_1 = K_2$ の場合の気体原子系における2光子レーザー発振光強度の離調特性 (n は逆転粒子密度の相対値)

審 査 結 果 の 要 旨

レーザーの動作は原理的には2準位系で実現されるが、実際の物質は多数のエネルギー準位をもつため、複数の異なる波長の光との共鳴的な相互作用が本質的な役割りを果たすことになり、その過程によって生じるさまざまな非線形光学効果の解明は新しいレーザー装置や光能動デバイスの開発に不可欠である。

著者はこのような観点から、コヒーレント光と相互作用する多準位系における非線形光学効果を時間ならびに周波数領域の両面から理論的に追究して来た。本論文はそれらの成果をとりまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、多準位系における非線形光学効果を記述する密度演算子の運動方程式を種々の時間領域で解くことにより、コヒーレントな非線形光学効果の分類と本質的特長を明らかにしている。

第3章では、コヒーレントに励起されたラマン活性媒質において、レーザー光とは反対方向に伝搬するストークス光の過渡的挙動を緩和時間より短い時間領域において解析し、両者の相互作用によって生じる変調特性を定量的に解明している。

第4章では、励起状態に2光子共鳴した系において発生する第3高調波のコヒーレントなパルス伝搬効果の解析解を求めると共に、大信号解析のために数値的検討を行い、この過程に特有な伝搬特性を見出して、変換効率の改善を得る具体的な方法を提示している。このことは新しい知見である。

第5章では、従来の1光子レーザーとは全く動作機構を異にする2光子レーザーについて、スペクトル幅が均一な広がりをもつ2光子遷移の場合の発振強度の周波数特性を解析することにより、中心周波数から離れるとカットオフ現象が生じることを明らかにしている。また、発振周波数の安定性や反ストークス光発振との競合など、2光子レーザーを実現する上で本質的な問題点について詳細な検討を加えて、その動作設計法を解明している。これらは重要な成果といえる。

第6章は、前章の解析をドップラー広がりをもつ気体粒子系に拡張して、その発振スペクトル特性を解析したもので、中心周波数の近傍にドップラー効果を打消す形で生じる2光子放出による発振のピークが現われることを定量的に示している。

第7章は総括と結論である。

以上要するに本論文は、コヒーレント光の多準位系媒質との相互作用において生じる非線形光学特性を、時間および周波数の両領域にわたって解析し、工学的応用の可能性を提示して、有用な知見を加えたもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。